



Offenlegungsschrift

⑯ DE 195 12 160 A 1

⑯ Int. Cl. 6:
H 01 S 3/115

H 01 S 3/098
H 01 S 3/16
H 01 S 3/094

⑯ Unionspriorität: ⑯ ⑯ ⑯
31.03.94 US 220911

⑯ Anmelder:
Imra America, Inc., Ann Arbor, Mich., US
⑯ Vertreter:
Tiedtke, Bühling, Kinne & Partner, 80336 München

⑯ Erfinder:
Galvanauskas, Almantas, Dr., Ann Arbor, Mich., US

⑯ Verfahren und Gerät zur Erzeugung ultrakurzer Impulse mit hoher Energie

⑯ Die vorliegende Erfindung richtet sich darauf, kompakte Systeme und Verfahren zur Erzeugung und Verstärkung von chirp-modulierten Impulsen bereitzustellen, um ultrakurze Impulse mit hoher Energie bereitzustellen. Ferner richtet sich die vorliegende Erfindung darauf, ein kompaktes System, das in der Herstellung zuverlässig und kosteneffizient ist, bereitzustellen. Gemäß beispielhaften Ausführungsformen können relativ kompakte abstimmbare Laser verwendet werden, um direkt lange optische chirp-modulierte Impulse zu erzeugen. Zum Beispiel können kompakte monolithische Halbleiterlaser, die relativ kleine Abmessungen haben (z. B. Abmessungen kleiner als von Festkörperlasern mit großem Körper) und die eine relativ schnelle Abstimmung (d. h. Veränderung) ihrer Emissionswellenlänge während der Erzeugung eines optischen Impulses zulassen, verwendet werden. Durch diese Impulsquellen wird jeder Bedarf an Volumen-Komponenten in dem Resonator von beispielsweise einem modenverkoppelten Femtosekunden-Laser bestätigt. Die relativ langen optischen chirp-modulierten Impulse können darauffolgend in mehreren Verstärkungsstufen verstärkt werden, wobei ihr Energiegehalt erhöht wird. Gemäß beispielhaften Ausführungsformen kann die Verstärkung in mehreren Stufen durch Unterdrücken der spontanen Emission zwischen den Stufen erreicht werden. Danach können die verstärkten Impulse wieder komprimiert werden.

DE 195 12 160 A 1

DE 195 12 160 A 1

Beschreibung

Die vorliegende Erfindung bezieht sich im allgemeinen auf das Gebiet der Laser-Technologie und insbesondere auf Verfahren und Geräte zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse mit hoher Energie.

Sowohl Halbleiterquellen (z. B. Dioden) als auch Faserquellen sind bekannt, die ultrakurze Energie-Impulse mit Impulsdauern von Sub-Picosekunden erzeugen können. Obwohl diese Energiequellen zuverlässigen, robusten Betrieb in einer kompakten, kosteneffizienten Weise bereitstellen können, hat ihre Unfähigkeit, Impulsennergien zu erzeugen, die mit denen der Festkörperquellen mit großem Körper ("large frame solidstate sources") vergleichbar sind, ihre praktische Verwendung eingeschränkt. In einem von dem Erfinder der vorliegenden Erfindung mitverfaßten Dokument mit dem Titel "Generation of femtosecond optical pulses with nanoJoule energy from a diode laser and fiber based system" von A. Galvanauskas et al., Appl. Phys. Lett. 63 (13), 27. September, 1993, 1993: Amer. Inst. of Physics, Seite 1742—1744, wird die Verwendung eines abstimmbaren Diodenlasers mit verteilter Bragg-Reflexion (DBR) zur Erzeugung von chirp-modulierten Impulsen bzw. Impulsen mit zeitproportionaler Frequenzmodulation beschrieben. Die chirp-modulierten Impulse werden auf Sub-Picosekunden-Dauer komprimiert und dann in einem erbiumdotierten Faserverstärker (EDFA) auf ein Niveau von 2 nJ verstärkt. Durch die starke nichtlineare Wechselwirkung in der Faser wird jedoch Impulsverzerrung verursacht, wodurch die erreichbare Energie verringert wird.

Das heißt, die Ausgangsenergie, die von seltenerddotierten Faserverstärkern entzogen werden kann, ist, obwohl sie potentiell hoch ist, durch den Wert der Spitzenleistung, die die Faserverstärker aushalten können, bevor nichtlineare Effekte und Aufbrechen der Impulse verursacht werden, eingeschränkt. Zum Beispiel haben erbiumdotierte Einzelmoden-Faserverstärker Sättigungsenergien von ungefähr einem Mikrojoule; und ein erbiumdotierter Vielmoden-Faserverstärker kann, wie in einem Dokument mit dem Titel "111 kW (0,5 mJ) pulse amplification at 1,5 μ m using a gated cascade of three erbium doped fiber amplifiers" von B. Destheux et al., Appl. Phys. Lett. 63 (5), 2. August 1993; Amer. Inst. of Physics, Seite 586—587 beschrieben, Impulsennergien so hoch wie 0,5 mJ erzeugen. In einem Faserverstärker muß jedoch eine niedrige Spitzenleistung aufrecht erhalten werden, da solche Energieniveaus die Spitzenleistung der verstärkten ultrakurzen Impulse für eine Faser (z. B. ungefähr 1 Megawatt für einen 1 Picosekunden-Impuls in einer Einmodenfaser) unakzeptabel hoch machen können. Das mit dieser Leistung verbundene Licht führt, wenn in dem schmalen Kern einer Faser eingeschlossen, zu hohen Spitzenintensitäten, die zu nichtlinearen Effekten und Aufbrechen von Impulsen führen können.

Eine Möglichkeit, eine niedrige Spitzenleistung in einem Verstärker aufrecht zu erhalten, ist gewesen, die Verstärkung chirp-modulierter Impulse zu verwenden, wobei die Impulse vor der Verstärkung gestreckt werden, wie in einem Dokument mit dem Titel "Compression of Amplified Chirped Optical Pulses" von Donna Strickland and Gerard Mourou, Elsevier Science Publishers B.V.: Optics Communications, Band 56, Nr. 3, 1. Dezember 1985 beschrieben. Wie dort beschrieben, wird die Dauer ultrakurzer Impulse von einem modenverkoppelten Festkörperlaser unter Verwendung einer

optischen Faser gestreckt. Danach werden die gestreckten Impulse verstärkt und dann unter Verwendung einer Doppelgitter-Kompressionseinrichtung komprimiert. Durch Verstärkung der gestreckten Impulse mit relativ langer Impulsdauer wird die Spitzenleistung in dem Verstärker relativ niedrig gehalten, so daß nichtlineare Effekte und Aufbrechen von Impulsen verhindert werden. In einem Dokument mit dem Titel "Generation of Ultra High Peak Power Pulses By Chirped Pulse Amplification", von P. Maine et al., IEEE Journal of Quantum Electronics, Band 24, Nr. 2, Februar 1988 wird eine ähnliche Verstärkungstechnik chirp-modulierter Impulse beschrieben, in der ein Beugungsgitterpaar anstelle einer optischen Faser zum Strecken der chirp-modulierten Impulse verwendet wird.

Die Verstärkungstechnik chirp-modulierter Impulse ist auch auf Faserverstärker unter Verwendung einer modenverkoppelten Faserlaserquelle für ultrakurze Impulse angewendet worden, wie in den folgenden drei Dokumenten beschrieben: (1) "Generation of High Power Ultrashort Pulses in Erbium Oscillator Power Amplifier Systems" von M.L. Stock et al., Optical Society of America Topical Meeting über Non-Linear Guided Wave Phenomenon, Cambridge 1993, Paper PD 5; (2) einem Dokument mit dem Titel "High-Power Chirped Pulse Amplification of Femtosecond Optical Pulses in a Diode-Pumped Fiber Laser and Amplifier System" von A. Galvanauskas et al., erhältlich von IMRA America, Inc., Ann Arbor, Michigan; und (3) "All-Fiber Source of 100 nJ sub-picosecond Pulses" von M.E. Fermann et al., Appl. Phys. Lett., Band 64, Nr. 11, 14. März 1994. Durch die in diesen späteren Dokumenten beschriebenen Techniken können Impulsennergien von bis zu 100 nJ mit einer Dauer von 700 Femtosekunden erzeugt werden.

Obwohl Systeme vorliegen, um ultrakurze Impulse mit erhöhter Impulsennergie zu erzeugen, haben solche Systeme bedeutende Nachteile. Zum Beispiel ist für die Verwendung für die Verstärkung chirp-modulierter Impulse mit modenverkoppelten Femtosekunden-Faserlasern oder Halbleiterlasern mit äußeren Resonatoren die Verwendung von Volumen-Komponenten erforderlich, und solche Systeme sind nicht speziell robust oder zuverlässig. Ferner werden modenverkoppelte Laser mit hohen Wiederholungsfrequenzen betrieben und sind daher für die Verwendung bei Hochenergie-Verstärkung, bei der relativ niedrige Impuls-Wiederholungsraten erforderlich sind, ungeeignet. Da modenverkoppelte Laser mit hohen Wiederholungsfrequenzen betrieben werden, werden komplizierte und teure Impuls-Auswahlsysteme verwendet, die ferner die Kompaktheit des gesamten Systems behindern. Zusätzlich wird durch die Verwendung einer Beugungsgitter-Streckvorrichtung die Kompaktheit und Robustheit des Gesamtsystems beeinträchtigt.

Demgemäß wäre es wünschenswert, ein kompaktes System mit der Eigenschaft, chirp-modulierte Impulse zu erzeugen und zu verstärken, bereitzustellen, um ultrakurze Impulse mit hoher Energie bereitzustellen. Ferner wäre es wünschenswert, ein kompaktes System bereitzustellen, das zuverlässig und kosteneffizient in der Herstellung ist.

Die vorliegende Erfindung richtet sich auf die Bereitstellung von kompakten Systemen und Verfahren zur Herstellung und Verstärkung von chirp-modulierten Impulsen, um ultrakurze Impulse mit hoher Energie bereitzustellen. Ferner richtet sich die vorliegende Erfindung darauf, ein kompaktes System bereitzustellen, das in der Herstellung zuverlässig und kosteneffizient ist.

Gemäß beispielhaften Ausführungsformen können relativ kompakte abstimmbare Laser verwendet werden, um direkt lange optische chirp-modulierte Impulse zu erzeugen. Zum Beispiel können kompakte monolithische Halbleiterlaser, die relativ kleine Abmessungen haben (z. B. Abmessungen, die kleiner sind als die der Festkörperlaser mit großem Körper sind) und die eine relativ schnelle Abstimmung (d. h. Veränderung) ihrer Emissionswellenlänge während der Erzeugung eines optischen Impulses zulassen, verwendet werden. Durch diese Impulsquellen wird jeder Bedarf an Volumen-Komponenten in dem Resonator von beispielsweise einem modenverkoppelten Femtosekunden-Laser beseitigt. Die relativ langen optischen chirp-modulierten Impulse können darauf folgend in mehreren Verstärkungsstufen unter Erhöhung ihres Energiegehalts verstärkt werden. Gemäß beispielhaften Ausführungsformen kann die Verstärkung in mehreren Stufen erreicht werden, indem man die spontane Emission zwischen den Stufen unterdrückt. Danach können die verstärkten Impulse wieder komprimiert werden.

Durch schnelles Abstimmen der Emissionswellenlänge eines abstimmbaren Lasers, wobei direkt relativ lange optische chirp-modulierte Impulse erzeugt werden, wird jeder Bedarf, Femtosekunden-Impulse, die durch ein System mit großem Körper erzeugt werden, zu strecken, beseitigt. Die chirp-modulierten Impulse können vor der Komprimierung verstärkt werden, wodurch nichtlineare Wechselwirkung in dem Verstärker vermieden wird. Beispielhafte Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung können somit deutlich kompakter gestaltet werden, sie können kosteneffizient hergestellt werden, wobei Systeme mit verbesserter Robustheit und Zuverlässigkeit bereitgestellt werden.

Um gepulste Energie mit hoher Spitzenleistung herzustellen, umfassen beispielhafte kompakte Systeme der vorliegenden Erfindung: Einrichtungen zur Erzeugung eines Energie-Impulses mit mehreren Wellenlängenbändern, wobei der Energie-Impuls in der Dauer durch Überlappen der Wellenlängenbänder komprimierbar ist; und Einrichtungen zum Erhöhen der Spitzenleistung des Energie-Impulses, wobei die Einrichtung zum Erhöhen der Spitzenleistung ferner: Einrichtungen zum Verstärken des Energie-Impulses in mehreren Stufen der Verstärkung unter Erzeugung eines verstärkten Energie-Impulses; und Einrichtungen zum Unterdrücken von spontaner Emission zwischen mindestens zwei Stufen der Verstärkungseinrichtung umfaßt.

Alternative beispielhafte Ausführungsformen umfassen Einrichtungen zur Erzeugung eines Energie-Impulses mit mehreren Wellenlängenbändern, wobei der Energie-Impuls in der Dauer durch Überlappen der Wellenlängenbänder komprimierbar ist; Einrichtungen zum Abstimmen einer Emissionswellenlänge der Einrichtung zur Erzeugung eines Energie-Impulses während der Erzeugung des Energie-Impulses; und Einrichtungen zum Erhöhen der Spitzenleistung des Energie-Impulses, wobei die Einrichtung zum Erhöhen der Spitzenleistung ferner: Einrichtungen zum Verstärken des Energie-Impulses in mehreren Stufen der Verstärkung unter Erzeugung eines verstärkten Energie-Impulses; Einrichtungen zum Unterdrücken der spontanen Emission zwischen mindestens zwei Stufen der Verstärkungseinrichtung; und Einrichtungen zum Komprimieren des verstärkten Energie-Impulses durch Überlappen der Wellenlängenbänder umfaßt.

Die vorliegende Erfindung kann ferner unter Bezugnahme auf die folgende Beschreibung und die beigefüg-

ten Zeichnungen verstanden werden, in denen ähnliche Elemente mit denselben Bezugszeichen versehen sind. In den Zeichnungen:

5 zeigt Fig. 1 ein beispielhaftes System zur Erzeugung von Impuls-Energie mit hoher Spitzenleistung gemäß der vorliegenden Erfindung;

10 zeigen die Fig. 2a bis 2b ein zeitintegriertes Leistungsspektrum 200 eines Impulses von einem abstimmbaren Dioden-Laser mit verteilter Bragg-Reflexion und eine gemessene Wellenlängen-Entwicklung 200 eines chirp-modulierten Impulses, der von einem abstimmbaren Dioden-Laser mit verteilter Bragg-Reflexion erzeugt wird;

15 zeigen die Fig. 3a bis 3b die Energien 300 und die durchschnittlichen Ausgangsleistung 302 der verstärkten Impulse bei verschiedenen Wiederholungsfrequenzen;

20 zeigt Fig. 4 ein Autokorrelationsverhalten 400 in Bezug auf die zweite Harmonische von komprimierten 1,8 Picosekunden-Impulsen; und

25 zeigt Fig. 5 eine alternative beispielhafte Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, die einen optischen Zirkulator bzw. eine optische Richtungsgabel umfaßt.

Fig. 1 veranschaulicht ein Gerät, das als ein kompaktes System 100 zur Erzeugung von gepulster Energie mit hoher Spitzenleistung unter Verwendung einer kompakten Quelle für ultrakurze Impulse mit Mikrojoule-Energien dargestellt wird. Das kompakte System 100 umfaßt Einrichtungen zur Erzeugung eines chirp-modulierten Impulses, wobei der chirp-modulierte Impuls ein Energie-Impuls mit mehreren Wellenlängenbändern ist, und der in der Dauer durch Überlappen der Wellenbänder komprimierbar ist. In dem kompakten System von Fig. 1 wird eine monolithische abstimmbare Laserdiode 102 verwendet, um direkt lineare optische chirp-modulierte Impulse mit breiter Bandbreite zu erzeugen. Da die Laserdiode monolithisch ist, zeigt sie nicht die Stabilitätsprobleme, die in anderen Faserquellen, beispielsweise modenverkoppelten Faserquellen, typisch sind.

30 In der beispielhaften Ausführungsform von Fig. 1 ist die abstimmbare Laserdiode 102 ein Diodenlaser mit verteilter Bragg-Reflexion mit drei Abschnitten. Positive Chirp-Modulation kann durch schnelles Abstimmen der Emissionswellenlänge des Diodenlasers mit verteilter Bragg-Reflexion erhalten werden. Schnelles Abstimmen der Emissionswellenlänge kann in einer Weise erreicht werden, die beispielsweise in einem Dokument mit dem Titel "Real-Time Picosecond Electro-Optic Oscilloscope Technique Using A Tunable Semiconductor Laser" von A. Galvanauskas, Appl. Phys. Lett., Band 60 (2), 1992, American Institute of Physics, 13. Januar 1992, Seite 145–147 beschrieben ist.

35 Der Diodenlaser 102 mit verteilter Bragg-Reflexion umfaßt einen aktiven Verstärkungsbereich 104, einen Phasensteuerungsbereich 106 und einem Bragg-Reflexionsbereich 108. Der Bragg-Reflexionsbereich 108 ist ein schmalbandiger Reflexionsfilter, der als ein Laserspiegel dient und der Laserbetrieb in nur einer longitudinalen Mode zuläßt. Durch Bewirken von Veränderungen des Brechungsindex des Phasensteuerungsbereichs 106 und des Bragg-Reflexionsbereichs 108 können die Wellenlänge der longitudinalen Mode und die Wellenlänge des Reflexionspeaks jeweils unabhängig verschoben werden.

40 Veränderungen in den Brechungsindizes der Abstimmbereiche (d. h. des Phasensteuerungsbereichs 106 und des Bragg-Reflexionsbereichs 108) können durch Erhöhung der Konzentration freier Ladungsträger in

diesen Abstimmbereichen eingeführt werden. Zum Beispiel erniedrigt eine Erhöhung der Konzentration freier Ladungsträger den Brechungsindex und verkürzt die Wellenlänge in einem gegebenen Abstimmbereich, und sie kann durch Anlegen von Stromimpulsen an die Abstimmbereiche 106 und 108 erreicht werden. Die Ladungsträgerkonzentration steigt zu Beginn von jedem Abstimmimpuls linear mit der Zeit an, wobei die Rate und Dauer des Anstiegs durch die Ladungsträger-Rekombinationsrate und die Größe des injizierten Stroms bestimmt werden. Der lineare Anstieg dauert typischerweise hunderte von Picosekunden. Die Größen der Strom-Impulse, die in den Phasensteuerungs- und Bragg-Abstimmbereich injiziert werden, können so ausgewählt werden, daß Wellenlängenverschiebungen in diesen beiden Abstimmbereichen gleich sein werden, wodurch kontinuierlich chirp-modulierte Sub-Nanosekunden-Impulse erzeugt werden.

Durch die schnelle Abstimmung des Diodenlasers 102 gemäß beispielhaften Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung werden signifikante Vorteile bereitgestellt. Zum Beispiel kann die Bandbreite der durch den Diodenlaser 102 erzeugten chirp-modulierten Impulse bis zu 15 Nanometer oder größer sein, wie beispielsweise in einem Dokument mit dem Titel "Optimization of The Carrier-Induced Effective Index Change In InGaAsP/InP Waveguides-Application To Tunable Bragg Filters" von Jean-Pierre Weber, Vorabdruck bzw. Preprint bei IEEE J. Quantum Electronics am 17. Dezember 1992 eingereicht, beschrieben. Diese Bandbreite entspricht einer umwandlungsbeschränkten Dauer von ungefähr 300 Femtosekunden für die komprimierten Impulse, und der Abstimmbereich von diesen InGaAsP/InP-Vorrichtungen ist typischerweise innerhalb des Verstärkungsbandes von erbiumdotierten Faserverstärkern.

Die Dauer und Bandbreite von chirp-modulierten Impulsen kann elektrisch innerhalb eines Bereiches in der Größenordnung von einer Picosekunde bis zu wenigen Nanosekunden oder größer gesteuert werden. Somit kann selbst bei Mikrojoule-Energien der Impuls verstärkt werden, während die Spitzenleistung relativ niedrig gehalten wird. Die Laserdiode kann sowohl in einer Einzelimpulsweise als auch mit variablen Wiederholungsraten von der Größenordnung von 10 Megahertz betrieben werden, wodurch die Optimierung der Verstärkungssättigung in einem erbiumdotierten Faserverstärker zugelassen wird. Die Fähigkeit, die Laserdiode mit variablen Wiederholungsraten zu betreiben, macht das System für viele praktische Anwendungen geeignet, umfassend, aber ohne Beschränkung, Abtast- bzw. Sampling-Messungen.

Nachdem Einrichtungen zur Erzeugung eines chirp-modulierten Impulses gemäß einer beispielhaften Ausführungsform der vorliegenden Erfindung beschrieben worden sind, werden nun zusätzliche Merkmale des kompakten Systems 100 beschrieben. Wie in Fig. 1 veranschaulicht, umfaßt das kompakte System ferner Einrichtungen zum Erhöhen der Spitzenleistung des Energie-Impulses. Die Einrichtung zum Erhöhen der Spitzenleistung umfaßt eine Einrichtung zum Verstärken des Energie-Impulses, die im allgemeinen als ein zweistufiger erbiumdotierter Faserverstärker 110 dargestellt wird, und eine Einrichtung zum Komprimieren des verstärkten Energie-Impulses durch Überlappen der Wellenlängenbänder, wobei die Komprimiereinrichtung im allgemeinen als ein Gitterpaar-Kompressor 112 dargestellt wird.

Der zweistufige erbiumdotierte Faserverstärker umfaßt einen Energie-Verstärker 114 für die erste Stufe mit einer seltenerd-(z. B. Erbium)dotierten Faser zum Bereitstellen eines ersten verstärkten Ausgangssignals und einen Energieverstärker 116 für die zweite Stufe auch mit einer seltenerd-(z. B. Erbium)dotierten Faser zum Empfangen des ersten verstärkten Ausgangssignals. Durch Verstärken von chirp-modulierten Nanosekunden-Impulsen von der abstimmhbaren Laserdiode in einer erbiumdotierten Faser wird die Sättigungsenergie des Verstärkers ohne Aufbrechen der Impulse erhalten. Gemäß der beispielhaften Ausführungsformen kann die Faser des Energieverstärkers 116 für die zweite Stufe kürzere Länge als die Faser des Energieverstärker 114 für die erste Stufe haben, wobei die Impulsfortbewegungslänge verringert wird, und dadurch der Effekt von Nichtlinearitäten in dem zweiten Energieverstärker verringert wird. Der Energieverstärker 116 für die zweite Stufe stellt ein zweites verstärktes Ausgangssignal bereit, das zu dem Gitterpaar-Kompressor 112 gelenkt wird.

Gemäß beispielhaften Ausführungsformen ist die Verstärkung eines einstufigen erbiumdotierten Einzeldurchlauf-Faserverstärkers, der als der erste und zweite Energieverstärker für ein chirp-moduliertes Signal mit breiter Bandbreite verwendet werden kann, auf ungefähr 20 bis 40 Dezibel beschränkt. Demgemäß kann der zweistufige erbiumdotierte Faserverstärker 110 insgesamt optische chirp-modulierte Impulse um ungefähr 40 bis 80 Dezibel verstärken (z. B. von Picojoule auf Mikrojoule).

Eine erste Pumpe 118, die mit dem Energieverstärker 114 für die erste Stufe verbunden ist, und eine zweite Pumpe 120, die mit dem Energieverstärker 116 für die zweite Stufe verbunden ist, sind in gegenläufiger Richtung in Bezug auf das Signal in sowohl dem ersten als auch dem zweiten Energieverstärker angeordnet, wodurch die Verstärkungs-Sättigungseigenschaft verbessert wird. In einer beispielhaften Ausführungsform kann der Energieverstärker 114 für die erste Stufe mit 70 mW bei 1,48 μ m unter Verwendung einer angeschlossenen ("pigtailed") Laserdiode gepumpt werden. Die Faser des ersten Energieverstärkers kann 40 Meter lang sein, einen Kerndurchmesser von 8 μ m, eine numerische Apertur von 0,2 und eine Dotierniveau von 580 ppm haben. Der zweite Energieverstärker kann 3,2 Meter lang sein, einen Kerndurchmesser von 7 μ m haben und einen hohen Dotierniveau von beispielsweise 5000 ppm haben. Die zweite Stufe kann mit einer Leistung von beispielsweise 330 mW unter Verwendung einer Wellenlänge von 980 nm gepumpt werden.

Da der erste und zweite Energieverstärker als Kaskaden vorliegen, wird die verstärkte spontane Emission von dem Energieverstärker 114 für die erste Stufe in dem Energieverstärker 116 für die zweite Stufe verstärkt werden. Demgemäß kann diese verstärkte spontane Emission stark genug sein, um die Verstärkung des zweiten Energieverstärkers zu sättigen, wodurch die Verstärkung in dem Verstärker für die zweite Stufe im wesentlichen verringert wird. Eine Einrichtung zum Erhöhen der Spitzenleistung gemäß der vorliegenden Erfindung umfaßt daher Einrichtungen, wie beispielsweise einen schnellen akusto-optischen Modulator 122, zum Unterdrücken der spontanen Emission zwischen dem Energieverstärker der ersten Stufe und dem Energieverstärker der zweiten Stufe.

Der akusto-optische Modulator 122 kann als ein optisches Gate bzw. Tor zwischen den Energieverstärkern

der ersten und zweiten Stufe verwendet werden, um die Sättigung des Verstärkers 116 der zweiten Stufe zu verhindern. Akustooptische Modulatoren sind typischerweise unempfindlich gegenüber der Polarisation und haben einen relativ niedrigen Einfügungsverlust. Der akustooptische Modulator 122 ist mit der Antriebselektronik des Diodenlasers 102 mit verteilter Bragg-Reflexion synchronisiert, so daß er sich nur öffnet, wenn verstärkte chirp-modulierte Impulse von dem Energieverstärker 114 der ersten Stufe erzeugt werden. Gemäß einer beispielhaften Ausführungsform kann eine Gate-Breite des akustooptischen Modulators 150 Nanosekunden sein, und eine Beugungseffizienz des Modulators für diese Gatebreite kann ungefähr 70% sein.

Das verstärkte Ausgangssignal von dem Energieverstärker 116 der zweiten Stufe wird in eine Kompressionsvorrichtung eingegeben, die mindestens ein Beugungsgitter umfaßt, so daß Impulse von mindestens Pi-kosekunden-Dauer mit Spitzenleistungen nahe bei einem Megawatt erhalten werden können. In der beispielhaften Ausführungsform von Fig. 1 ist das Beugungsgitterpaar 112 in einer Anordnung mit negativer Dispersion angeordnet, wobei die lineare positive Chirp-Modulation der empfangenen verstärkten Impulsenergie kompensiert wird. Beispielsweise können Beugungsgitter mit 1200 Linien pro Millimeter in einer Standard-Kompressionsanordnung mit negativer Dispersion verwendet werden, um lineare Chirp-Modulation von Impulsen zu kompensieren, die von dem zweistufigen Verstärker 110 ausgegeben werden.

Während Komponenten der beispielhaften Ausführungsform von Fig. 1 in einer linearen Anordnung ausgeführt werden können, können zur Bequemlichkeit der Veranschaulichung und zur Kompaktheit bei der Ausführung Spiegel enthalten sein, um eine Umanordnung der Komponenten von Fig. 1 zuzulassen. Zum Beispiel können Spiegel 124 und 126 in dem zweistufigen Verstärker verwendet werden, um Energie von der ersten Stufe zu dem akustooptischen Modulator zu richten, und um Energie von dem akustooptischen Modulator zu der zweiten Stufe zu richten. Wie veranschaulicht, können die Spiegel 124 und 126 jeweils verwendet werden, um die Energie um 90 Grad umzulenken. In ähnlicher Weise können Spiegel 128 und 130 zwischen dem zweistufigen Verstärker und dem Gitterpaar-Kompressor 112 verwendet werden, um Energie von dem zweistufigen Verstärker in den Kompressor zu richten. Wie in Fig. 1 veranschaulicht, lenkt der Spiegel 128 Energie um 90 Grad um, während der Spiegel 130 Energie um einen Winkel, der geringfügig größer als 90 Grad ist, in den Gitterpaar Kompressor 112 lenkt.

Die beispielhafte Ausführungsform von Fig. 1 kann auch einen Spiegel 132 umfassen, um Energie von dem zweistufigen Verstärker zu dem Gitterpaar-Kompressor zu lenken und um die komprimierte Energie von dem Gitterpaar-Kompressor zu einem Ausgang als gepulste Energie mit hoher Spitzenleistung zu reflektieren.

Eine beispielhafte Ausführung des kompakten Systems von Fig. 1 wird nun in größerem Detail unter Bezugnahme auf die Fig. 2 bis 4 beschrieben. In den Fig. 2(a) und (b) wird ein typisches integriertes Leistungsspektrum 200 in Fig. 2(a) gezeigt, und eine entsprechende Wellenlängenentwicklung 202 von optischen chirp-modulierten Impulsen, die mit der Laserdiode 102 mit verteilter Bragg-Reflexion erzeugt werden, wird in Fig. 2(b) gezeigt. In dem Energieverstärker 114 der ersten Stufe kann die Impulsenergie von beispiels-

weise 25 pJ bis zu ungefähr 5 nJ erhöht werden. Nachdem es durch den akustooptischen Modulator 122 geleitet wurde, ist nur noch ein Bruchteil der Gesamtenergie pro Impuls (zum Beispiel weniger als 10%) in dem 5 Hintergrund der spontanen Emission enthalten.

Durch Variieren der Wiederholungsfrequenz der Laserdiode 102 von ungefähr 1 Kilohertz auf 3 Kilohertz tritt nur schwache Sättigung der Verstärkung in dem Energieverstärker der ersten Stufe auf. Die Energie der verstärkten Impulse wird jedoch in dem Verstärker der zweiten Stufe beträchtlich höher sein, so daß die Verstärkungssättigung in dieser zweiten Stufe stärker ausgeprägt sein wird. Wie in den Fig. 3(a) und 3(b) veranschaulicht, kann eine Energie von beispielsweise 2 Mikrojoule bei Frequenzen zwischen 1 Kilohertz und 10 Kilohertz erhalten werden. Dies entspricht einer Gesamtverstärkung von 49 Dezibel, wenn der zweistufige Energieverstärker von Fig. 1 verwendet wird. Wie in Fig. 3(a) veranschaulicht, nimmt bei Frequenzen größer als 10 Kilohertz die Impulsenergie in der vorstehend beschriebenen beispielhaften Ausführungsform mit einem Ansteigen der Wiederholungsraten ab (wobei beispielsweise 50 Nanojoule bei 100 Kilohertz erreicht werden). Gemäß einer beispielhaften Ausführungsform kann die durchschnittliche Signalleistung bei 10 Kilohertz ungefähr 20 Milliwatt sein, und bei Frequenzen größer als 40 Kilohertz kann sie ungefähr 50 Milliwatt sein, wie in dem beispielhaften Diagramm in Fig. 3(b) veranschaulicht wird.

Der Gitterpaar-Kompressor 112 kann verwendet werden, um die Impulse auf ungefähr 1,8 Picosekunden oder weniger (d. h. Sub-Picosekundenbereich) zu komprimieren, wie in Fig. 4 veranschaulicht, bei einer Energie von ungefähr 800 nJ. Durch Erhöhen der Linearität der Chirp-Modulation der anfänglichen Impulse von der Laserdiode 102 und durch Minimieren der optischen Nichtlinearitäten in dem Energieverstärker der zweiten Stufe bei hohen Spitzenleistungen können kürzere Impulse erhalten werden.

Gemäß einer alternativen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, wie in Fig. 5 veranschaulicht, kann ein kompaktes System zur Erzeugung von gepulster Energie mit hoher Spitzenleistung eine Verstärkereinrichtung für Energie-Impulse mit mindestens einem Energieverstärker und Einrichtungen, um den Energie-Impuls durch den mindestens einen Energieverstärker mehrere Male durchlaufen zu lassen, umfassen. Insbesondere kann der zweistufige Verstärker 110 der Ausführungsform von Fig. 1 unter Verwendung eines einstufigen erbiumdotierten Faserverstärkers 502 und eines optischen Zirkulators 605 ausgeführt werden. Man kann das Signal in gegenläufiger Richtung in Bezug auf eine optische Pumpe 504 durchlaufen lassen. Der optische Zirkulator 506 kann in Zusammenhang mit einer Reflexionseinrichtung, die als Spiegel 508 dargestellt wird, verwendet werden, wobei optische Eingangs-Impulse, die von einer Impulsquelle wie beispielsweise der abstimmbaren Laserdiode mit verteilter Bragg-Reflexion von Fig. 1 empfangen werden, ein- oder mehrere Male durch den einstufigen Verstärker 502 durchgeleitet werden, wodurch mehrere Stufen der Verstärkung ausgeführt werden. Diese Anordnung kann somit verwendet werden, um die von dem einzelnen Verstärker entzogene Energie zu erhöhen.

In der beispielhaften Ausführungsform von Fig. 5 ist der einstufige Energieverstärker 502 ein Faserverstärker mit zwei Durchläufen, der ein verstärktes Ausgangssignal erzeugt, das zu einer Kompressionseinrichtung

wie beispielsweise dem Gitterpaar-Kompressor von Fig. 1 gerichtet werden kann. Durch die Verwendung eines Verstärkers mit mehreren Durchläufen als vielstufiger Verstärker kann jeder Bedarf an mehreren Faser-verstärkern beseitigt werden.

Zusätzlich zu dem optischen Zirkulator 506 umfaßt die Ausführungsform von Fig. 5 Einrichtungen zum Unterdrücken der spontanen Emission zwischen den mehreren Stufen der Verstärkung, die als optisches Gate 510 dargestellt werden. Wie bei der Ausführungsform von Fig. 1 kann das optische Gate mit der Einrichtung von Impuls-Energie in einer herkömmlichen Weise synchronisiert sein, so daß das optische Gate selektiv Impulse von der Laserdiode durchläßt.

Somit können in beispielhaften Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung optische Impulse mit Picosekunden-Dauer oder weniger mit Mikrojoule-Energie unter Verwendung eines kompakten Systems erzeugt werden, das einen abstimmbaren Diodenlaser und vielfache Stufen der Verstärkung umfaßt. Die vielfachen Stufen der Verstärkung können entweder als ein Einzelstufenverstärker und optischer Zirkulator, als ein Vielstufenverstärker mit separaten Verstärkungsstufen oder als eine Kombination aus einem Einzelstufenverstärker/optischen Zirkulator und separaten Verstärkungsstufen ausgeführt werden. Die geschätzte Spitzenleistung von verstärkten, komprimierten Impulsen kann 0,5 Megawatt oder größer sein, bei Impulsdauern in dem Sub-Picosekundenbereich.

Fachleute werden natürlich einschätzen, daß Ausführungsformen außer den vorstehend beschriebenen gemäß der vorliegenden Erfindung verwirklicht werden können. Zum Beispiel können wie früher erwähnt die erbiumdotierten Faserverstärker in den beschriebenen beispielhaften Ausführungsformen unter Verwendung von jedem erhältlichen Typ von Faserverstärkern verwirklicht werden. Alternativ kann das System Volumen-Verstärker zum Erreichen von hohen Impuls-Energien umfassen.

Die unter Bezugnahme auf die Fig. 1 bis 5 beschriebenen beispielhaften Ausführungsformen umfassen eine zweistufige Anordnung, in der zwei Stufen der Verstärkung unter Verwendung von zwei separaten Energie-verstärkern oder unter Verwendung von zwei Durchläufen in Bezug auf einen einstufigen Verstärker durchgeführt werden. Fachleute werden jedoch einschätzen, daß hohe Energien erhalten werden können, indem man die Anzahl der Stufen (d. h. die Anzahl der separaten Verstärkerstufen und/oder die Anzahl der verwendeten Durchläufe) erhöht.

Ferner werden Fachleute einschätzen, daß, während ein akusto-optischer Modulator zwischen jeder der vielfachen Stufen des Verstärkers enthalten ist, weitere Typen von Vorrichtungen zum Unterdrücken der spontanen Emission zwischen den Verstärkungsstufen verwendet werden können. Anstelle eines akusto-optischen Modulators können elektrooptischen Schalter, optische Filter, sättigbare Absorber oder jeder relativ schnelle optische Schalter als beispielhafte Alternativen verwendet werden.

Die vorstehend beschriebenen beispielhaften Ausführungsformen umfassen eine chirp-modulierte Halbleiter-Impulsquelle, die als ein Diodenlaser mit verteilter Bragg-Reflexion mit drei Abschnitten dargestellt wird. Fachleute werden jedoch einschätzen, daß jede Laser-vorrichtung (z. B. jede Halbleiter-, optische Faser- oder optische Wellenleiter-Laserenergiequelle), deren Emissionswellenlänge in einer relativ schnellen Weise abge-

stimmt werden kann (z. B. wobei die Dauer und Bandbreite der chirp-modulierten Impulse innerhalb eines Bereichs von der Größenordnung von mindestens einer Picosekunde bis zu mehreren Nanosekunden oder größer gesteuert wird), als die energieerzeugende Einrichtung verwendet werden kann.

In beispielhaften Ausführungsformen kann der Laser in einer Zeitdauer abgestimmt werden, die in einem Bereich von beispielsweise von einer Picosekunde bis zu mehreren Nanosekunden (oder größer, wenn angemessene Komprimierung des ausgegebenen Impulses durchgeführt werden kann) liegt. Fachleute werden einschätzen, daß der einzige begrenzende Faktor in Bezug auf die Auswahl der Energie-Impulsquelle die Länge der Impulse ist, die zuverlässig komprimiert werden kann. Wenn die Impulsdauer erhöht wird, wird es zunehmend schwierig, den Impuls in Folge auf die Verstärkung zu komprimieren. Somit kann, vorausgesetzt, daß geeignete Kompression erreicht werden kann, jede erhältliche Laserquelle als Einrichtung zur Erzeugung von Energie-Impulsen, umfassend Wellenleiterlaser verwendet werden. Weitere abstimmbare Laserdioden, die als eine gepulste Energiequelle gemäß beispielhaften Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung verwendet werden können, und die in einer Weise ähnlich der Laserdiode mit verteilter Bragg-Reflexion, die in Bezug auf die Fig. 1 beschrieben wurde, funktionieren können, umfassen beispielsweise die abstimmbaren Laserquellen, die in dem Dokument mit dem Titel "Broadly Tunable InGaAsP/InP Laser Based On A Vertical Coupler Filter With 57-nm Tuning Range" von R.C. Alferness et al., Appl. Phys. Lett., Band 60, 1992, Seite 3209–3211 beschrieben werden.

Ferner ist die Anordnung in Gegen-Fortbewegungsrichtung der Pumpen 116 und 118 in Bezug auf Signale, die in die Verstärkerstufen eingegeben werden, nur ein Beispiel. Fachleute werden einschätzen, daß Pumpen, die in gleicher Fortbewegungsrichtung in Bezug auf die Signal-Impulse, die in die Verstärker eingegeben werden, angeordnet sind, auch verwendet werden können.

Fachleute werden einschätzen, daß die vorliegende Erfindung in weiteren spezifischen Formen ausgeführt werden kann, ohne von ihrem Geist oder ihren wesentlichen Eigenschaften abzuweichen. Die vorliegend beschriebenen Ausführungsformen werden daher in jeder Hinsicht als veranschaulichend und nicht beschränkend angesehen. Der Umfang der Erfindung wird eher durch die beigefügten Ansprüche als die vorstehende Beschreibung angegeben, und alle Änderungen, die innerhalb der Bedeutung und des Bereichs und der Entsprechung der Ansprüche liegen, sollen in ihr enthalten sein.

Die vorliegende Erfindung richtet sich darauf, kompakte Systeme und Verfahren zur Erzeugung und Verstärkung von chirp-modulierten Impulsen bereitzustellen, um ultrakurze Impulse mit hoher Energie bereitzustellen. Ferner richtet sich die vorliegende Erfindung darauf, ein kompaktes System, das in der Herstellung zuverlässig und kosteneffizient ist, bereitzustellen. Gemäß beispielhaften Ausführungsformen können relativ kompakte abstimmbare Laser verwendet werden, um direkt lange optische chirp-modulierte Impulse zu erzeugen. Zum Beispiel können kompakte monolithische Halbleiterlaser, die relativ kleine Abmessungen haben (z. B. Abmessungen kleiner als von Festkörperlasern mit großem Körper) und die eine relativ schnelle Abstimmung (d. h. Veränderung) ihrer Emissionswellenlänge während der Erzeugung eines optischen Impulses zulassen, verwendet werden. Durch diese Impulsquellen wird

jeder Bedarf an Volumen-Komponenten in dem Resonator von beispielsweise einem modenverkoppelten Femtosekunden-Laser beseitigt. Die relativ langen optischen chirp-modulierten Impulse können darauf folgend in mehreren Verstärkungsstufen verstärkt werden, wobei ihr Energiegehalt erhöht wird. Gemäß beispielhaften Ausführungsformen kann die Verstärkung in mehreren Stufen durch Unterdrücken der spontanen Emission zwischen den Stufen erreicht werden. Danach können die verstärkten Impulse wieder komprimiert werden.

5

10

Patentansprüche

1. Gerät zur Erzeugung von gepulster Energie mit hoher Spitzenleistung, umfassend:

15

Einrichtungen zum Erzeugen eines abstimmbaren und komprimierbaren Energie-Impulses mit mehreren Wellenlängenbändern durch Abstimmen einer Emissionswellenlänge des Energie-Impulses, wobei die Dauer des Energie-Impulses durch Überlappen der Wellenlängenbänder komprimierbar ist; und

25

Einrichtungen zum Erhöhen der Spitzenleistung des Energie-Impulses, wobei die Einrichtung zum Erhöhen der Spitzenleistung ferner umfaßt: Einrichtungen zum Verstärken des Energie-Impulses in mehreren Stufen der Verstärkung, unter Erzeugung eines verstärkten Energie-Impulses; und Einrichtungen zum Unterdrücken der spontanen Emission zwischen mindestens zwei Stufen der Verstärkungseinrichtung.

35

2. Gerät nach Anspruch 1, ferner umfassend: Einrichtungen zum Komprimieren des verstärkten Energie-Impulses durch Überlappen der Wellenlängenbänder.

40

3. Gerät nach Anspruch 1, wobei die Einrichtung zum Erzeugen von Energie-Impulsen eine Energiequelle mit einer Emissionswellenlänge, die in einer Zeitdauer in einem Bereich von einer Picosekunde bis zu mehreren Nanosekunden während der Erzeugung des Energie-Impulses abgestimmt werden kann, umfaßt.

45

4. Gerät nach Anspruch 1, wobei die Einrichtung zum Erzeugen von Energie-Impulsen eine Halbleiterlaser-Energiequelle und/oder eine optische Faserlaser-Energiequelle und/oder eine optische Wellenleiter-Laserenergiequelle umfaßt.

50

5. Gerät nach Anspruch 1, wobei die Einrichtung zum Erzeugen von Energie-Impulsen ein abstimmbarer Diodenlaser mit verteilter Bragg-Reflexion ist, der einen aktiven Bereich, einen Phasensteuerungsbereich und einen Bragg-Reflexionsbereich umfaßt.

55

6. Gerät nach Anspruch 1, wobei die Verstärkungseinrichtung einen ersten Energieverstärker zum Empfangen des Energie-Impulses von der Einrichtung zur Erzeugung von Energie-Impulsen und zum Bereitstellen eines ersten verstärkten Ausgangssignals; und einen zweiten Energie-Verstärker zum Empfangen des ersten verstärkten Ausgangssignals und zum Bereitstellen eines zweiten verstärkten Ausgangssignals umfaßt.

60

7. Gerät nach Anspruch 6, ferner umfassend: Einrichtungen zum Komprimieren des verstärkten Energie-Impulses durch Überlappen der Wellenlängenbänder.

65

8. Gerät nach Anspruch 7, wobei der erste und

zweite Energieverstärker seltenerd-dotierte Fasern umfassen und wobei die Einrichtung zum Unterdrücken der spontanen Emission eine optische Gate-Einrichtung umfaßt, die mit der Einrichtung zum Erzeugen der gepulsten Energie synchronisiert ist.

9. Gerät nach Anspruch 1, wobei die Verstärkungseinrichtung folgendes umfaßt:

einen ersten Energieverstärker mit einer seltenerd-dotierten Faser zum Bereitstellen eines ersten verstärkten Ausgangssignals; und einen zweiten Energieverstärker mit einer seltenerd-dotierten Faser zum Empfangen des ersten verstärkten Ausgangssignals, wobei die Faser des zweiten Energieverstärkers kürzere Länge als die Faser des ersten Energieverstärkers hat, wobei die Impuls-Fortbewegungslänge verringert wird.

10. Gerät nach Anspruch 1, wobei die Verstärkungseinrichtung

mindestens einen Faserverstärker; und Einrichtungen, um den Energie-Impuls durch den mindestens einen Faserverstärker mehrere Male durchlaufen zu lassen, um die mehreren Stufen der Verstärkung bereitzustellen, umfaßt.

11. Gerät nach Anspruch 10, wobei die Einrichtung zum Unterdrücken eine optische Gate-Vorrichtung umfaßt, die mit den mehreren energieerzeugenden Einrichtungen synchronisiert ist.

12. Gerät nach Anspruch 2, wobei die Einrichtung zum Komprimieren mindestens ein Beugungsgitter zum Komprimieren des verstärkten Energie-Impulses durch Überlappen der Wellenlängenbänder umfaßt.

13. Gerät nach Anspruch 12, wobei die Einrichtung zum Komprimieren mindestens ein Paar Beugungsgitter umfaßt.

14. Gerät nach Anspruch 12, wobei die Einrichtung zum Komprimieren ein Paar Beugungsgitter umfaßt, die in einer Anordnung mit negativer Dispersion angeordnet sind, um die lineare Chirp-Modulation der verstärkten Impulsenergie zu kompensieren.

15. Gerät zum Erzeugen von gepulster Energie mit hoher Spitzenleistung, umfassend:

Einrichtungen zum Erzeugen eines komprimierbaren Energie-Impulses mit mehreren Wellenlängenbändern, wobei die Dauer des Energie-Impulses durch Überlappen der Wellenlängenbänder komprimierbar ist;

Einrichtungen zum Abstimmen einer Emissionswellenlänge der Einrichtung zum Erzeugen des Energie-Impulses während der Erzeugung des Energie-Impulses; und

Einrichtungen zum Erhöhen der Spitzenleistung des Energie-Impulses, wobei die Einrichtung zum Erhöhen der Spitzenleistung ferner folgendes umfaßt:

Einrichtungen zum Verstärken des Energie-Impulses in mehreren Stufen der Verstärkung unter Erzeugung eines verstärkten Energie-Impulses;

Einrichtungen zum Unterdrücken der spontanen Emission zwischen mindestens zwei Stufen der Verstärkungseinrichtung; und

Einrichtungen zum Komprimieren des verstärkten Energie-Impulses durch Überlappen der Wellenlängenbänder.

16. Gerät nach Anspruch 15, wobei die Einrichtung

zum Erzeugen von Energie-Impulsen ein abstimmbarer Diodenlaser mit verteilter Bragg-Reflexion ist, welcher einen aktiven Bereich, einen Phasensteuerungsbereich und einen Bragg-Reflexionsbereich umfaßt.

5

17. Gerät nach Anspruch 16, wobei die Verstärkungseinrichtung folgendes umfaßt:

einen ersten Energieverstärker mit einer seltenerdotierten Faser zum Bereitstellen eines ersten verstärkten Ausgangssignals; und

10

einen zweiten Energieverstärker mit einer seltenerdotierten Faser zum Empfangen des ersten verstärkten Ausgangssignals, wobei die Faser des zweiten Energieverstärkers kürzer als die Faser des ersten Energieverstärkers ist, wobei die Impuls-Fortbewegungslänge verringert wird.

15

18. Gerät nach Anspruch 17, wobei die Einrichtung zum Unterdrücken ferner eine optische Gate-Vorrichtung umfaßt, die mit der Einrichtung zum Erzeugen von gepulster Energie synchronisiert ist.

20

19. Gerät nach Anspruch 15, wobei die Einrichtung zum Verstärken von Energie-Impulsen

mindestens einen Energieverstärker; und Einrichtungen, um den Energie-Impuls durch den mindestens einen Energieverstärker mehrere Male durchlaufen zu lassen, um die mehreren Stufen der Verstärkung bereitzustellen, umfaßt.

25

20. Verfahren zur Erzeugung von gepulster Energie mit hoher Spitzenleistung, umfassend die folgenden Schritte:

30

Abstimmen einer Emissionswellenlänge einer Einrichtung zum Erzeugen von Energie-Impulsen, wobei komprimierbare Energie-Impulse mit mehreren Wellenlängenbändern bereitgestellt werden; Verstärken des Energie-Impulses unter Verwendung mehrerer Stufen der Verstärkung unter Erzeugung eines verstärkten Energie-Impulses; und Unterdrücken der spontanen Emission -zwischen den mindestens zwei Verstärkungsstufen.

35

21. Verfahren nach Anspruch 20, ferner umfassend einen Schritt zum:

Komprimieren des verstärkten Energie-Impulses durch Überlappen der Wellenlängenbänder.

22. Verfahren nach Anspruch 20, ferner umfassend einen Schritt zum:

Abstimmen der Emissionswellenlänge der Einrichtung zum Erzeugen von Energie-Impulsen in einer Zeitdauer in einem Bereich von einer Picosekunde bis zu mehreren Nanosekunden während der Erzeugung des Energie-Impulses.

50

23. Verfahren nach Anspruch 21, wobei der Schritt zum Verstärken ferner einen Schritt zum:

Verstärken des Energie-Impulses unter Verwendung einer Vielzahl von seltenerdotierten Faser-verstärkern umfaßt.

55

24. Verfahren nach Anspruch 21, wobei der Schritt zum Verstärken ferner einen Schritt, um den Energie-Impuls durch den mindestens einen Energieverstärker mehrere Male durchlaufen zu lassen, umfaßt, um die mehreren Stufen der Verstärkung bereitzustellen.

60

- Leerseite -

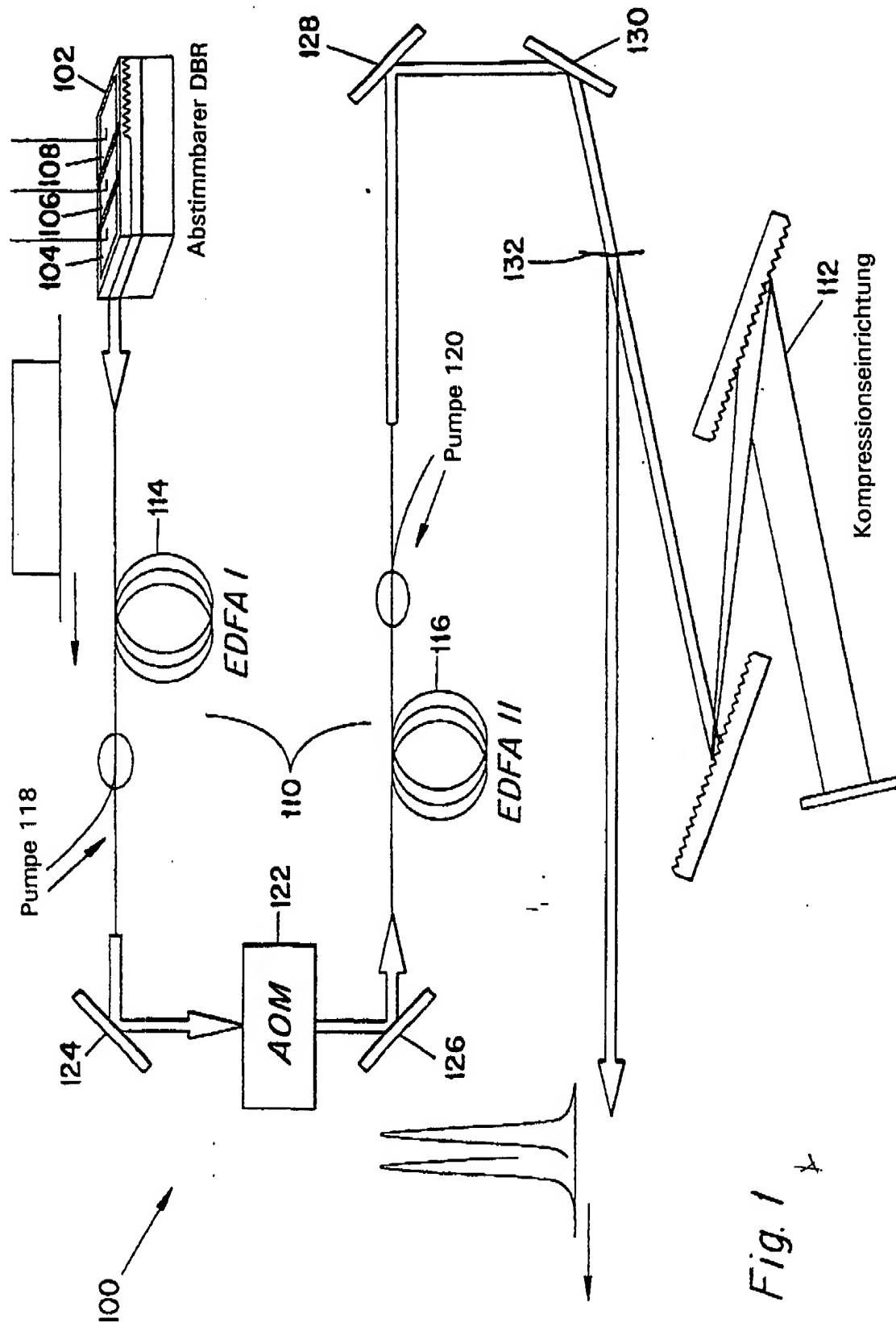


Fig. 1

Fig. 2(a)

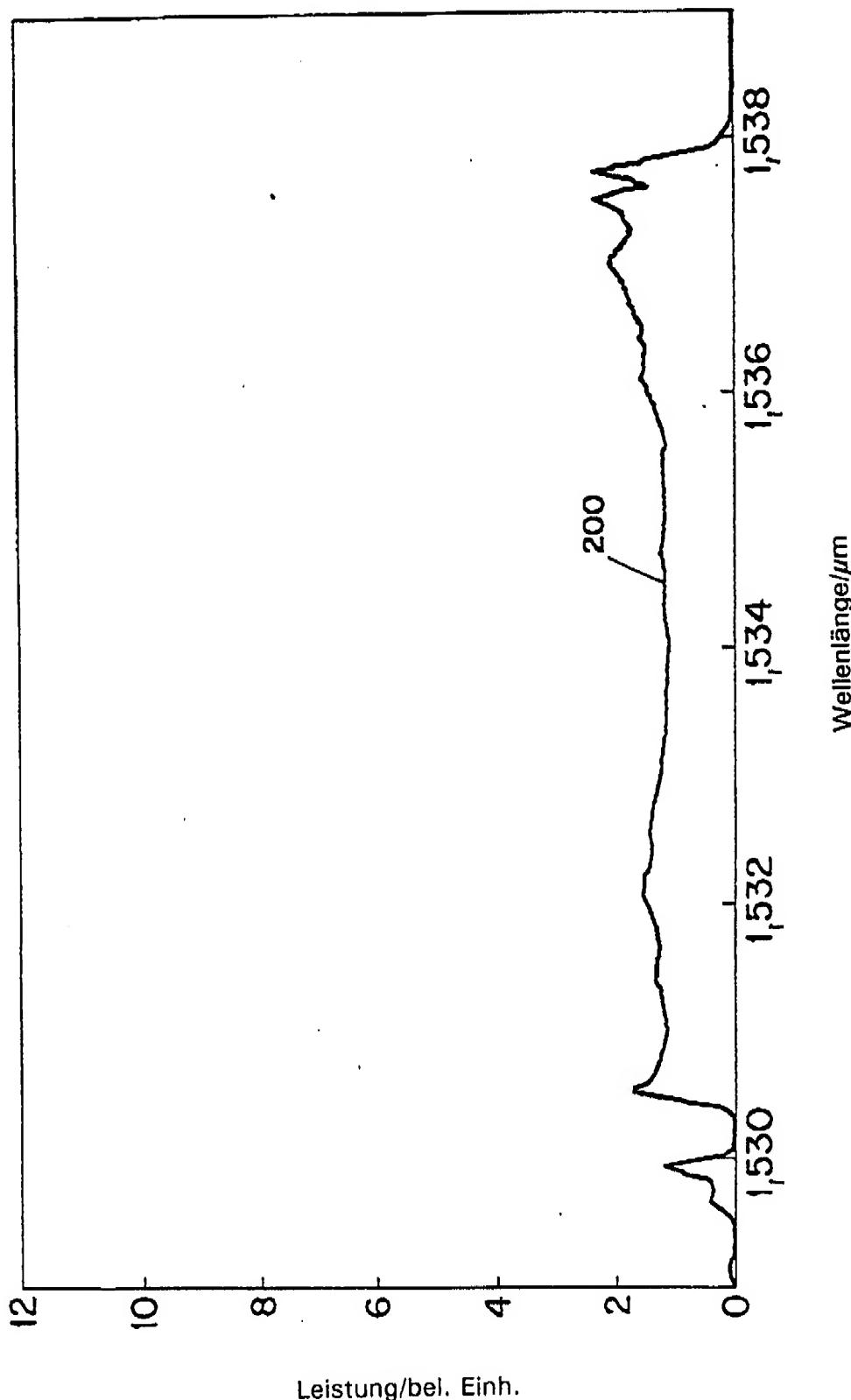


Fig. 2(b)

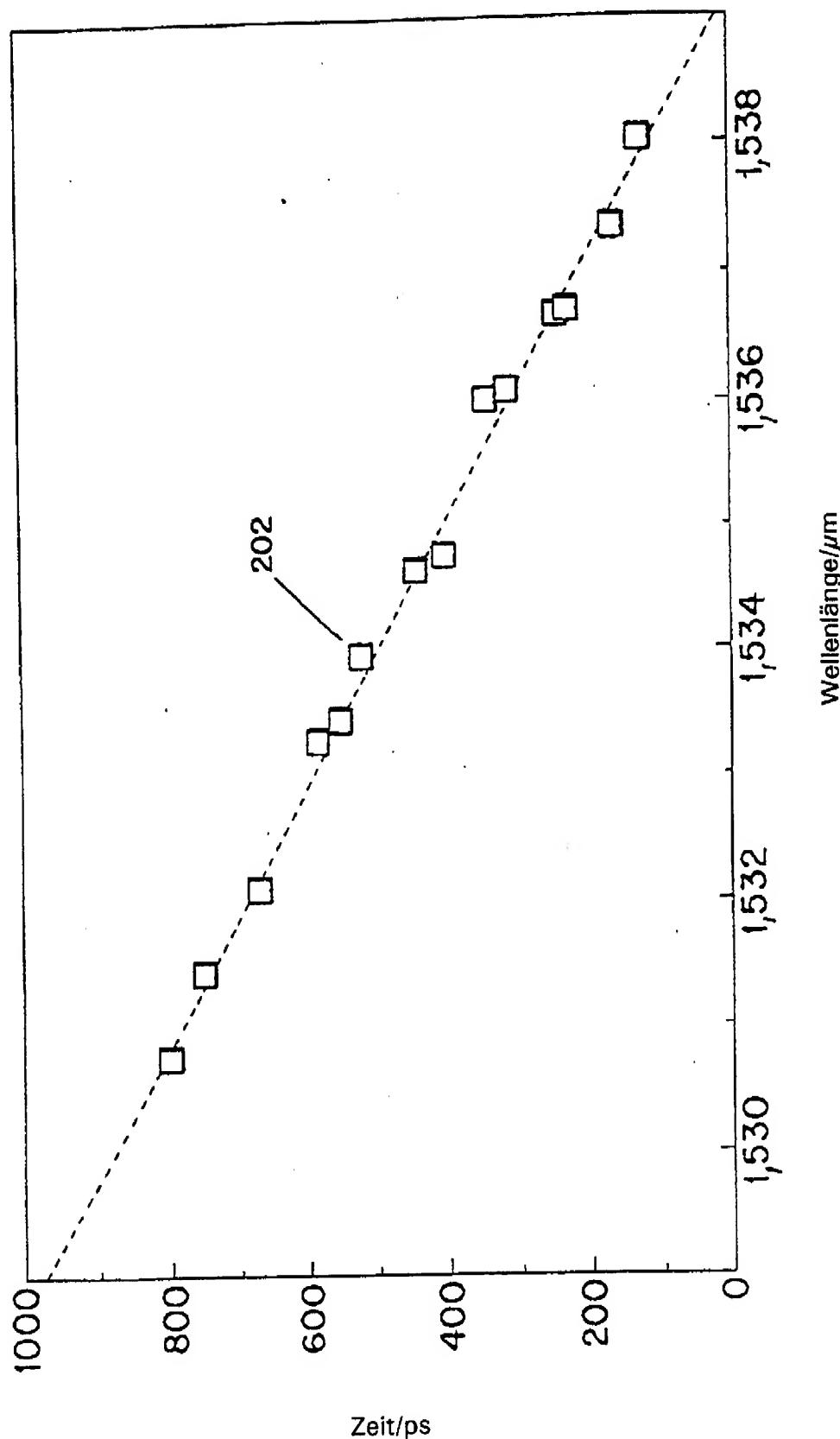


Fig. 3(a)

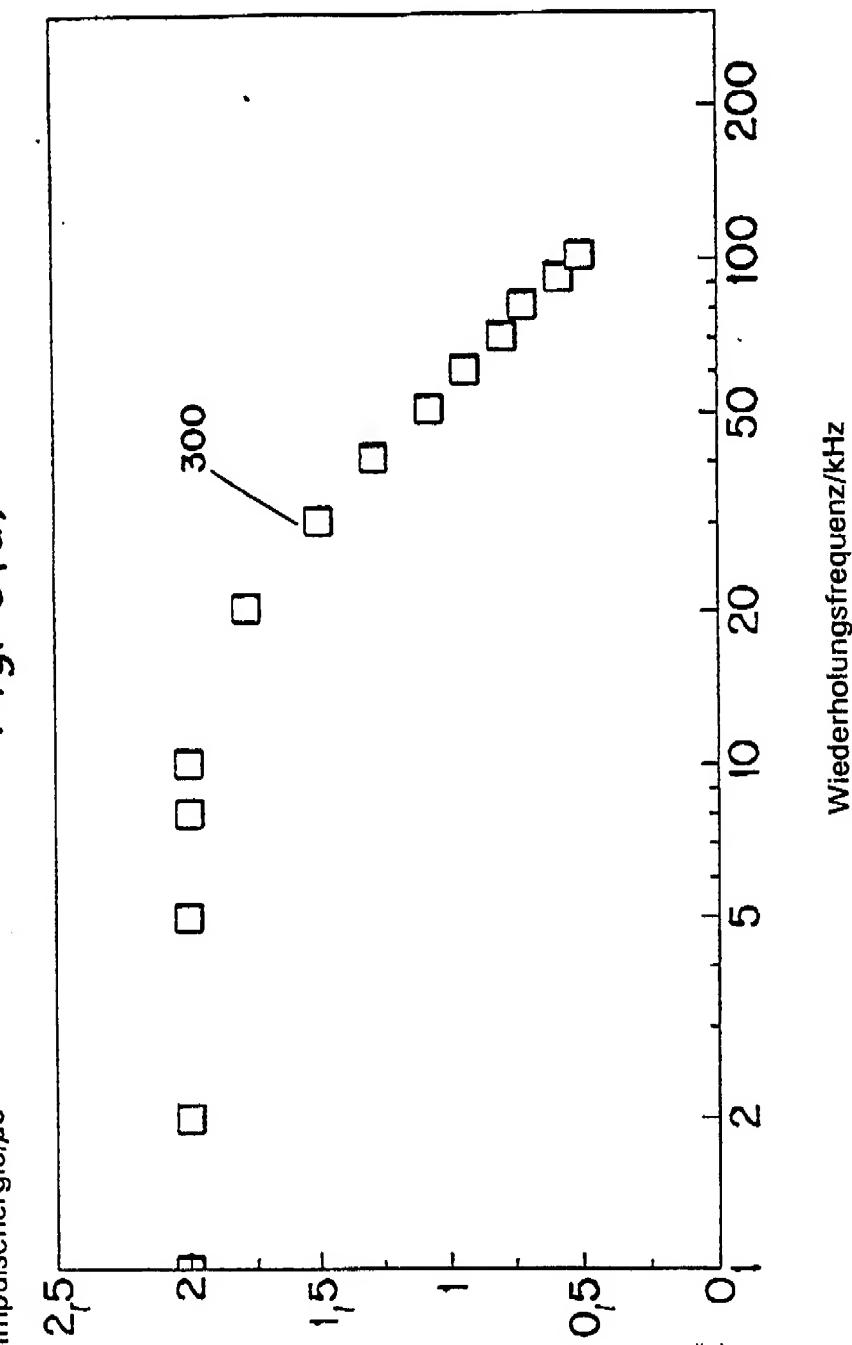


Fig. 3(b)

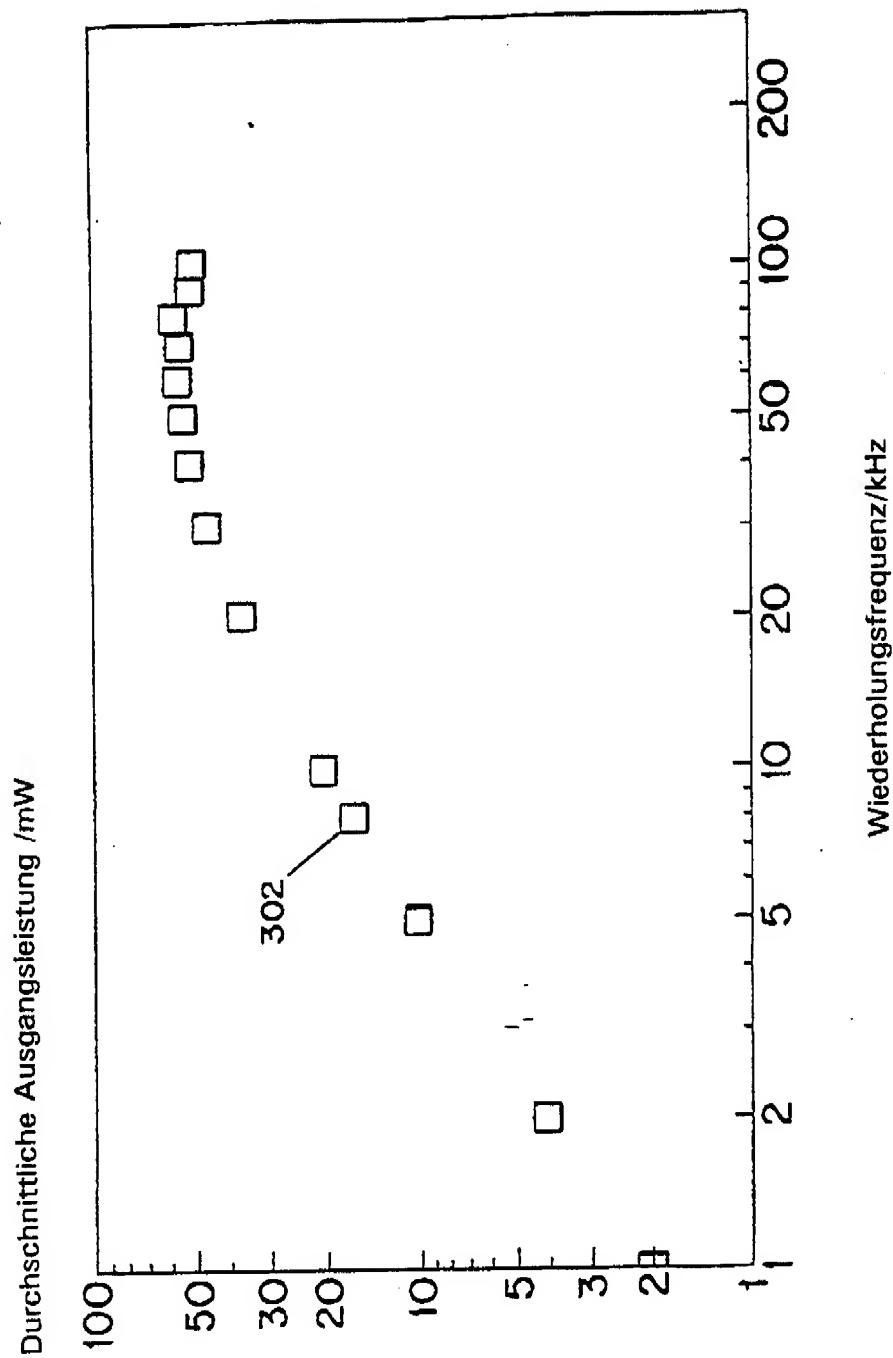
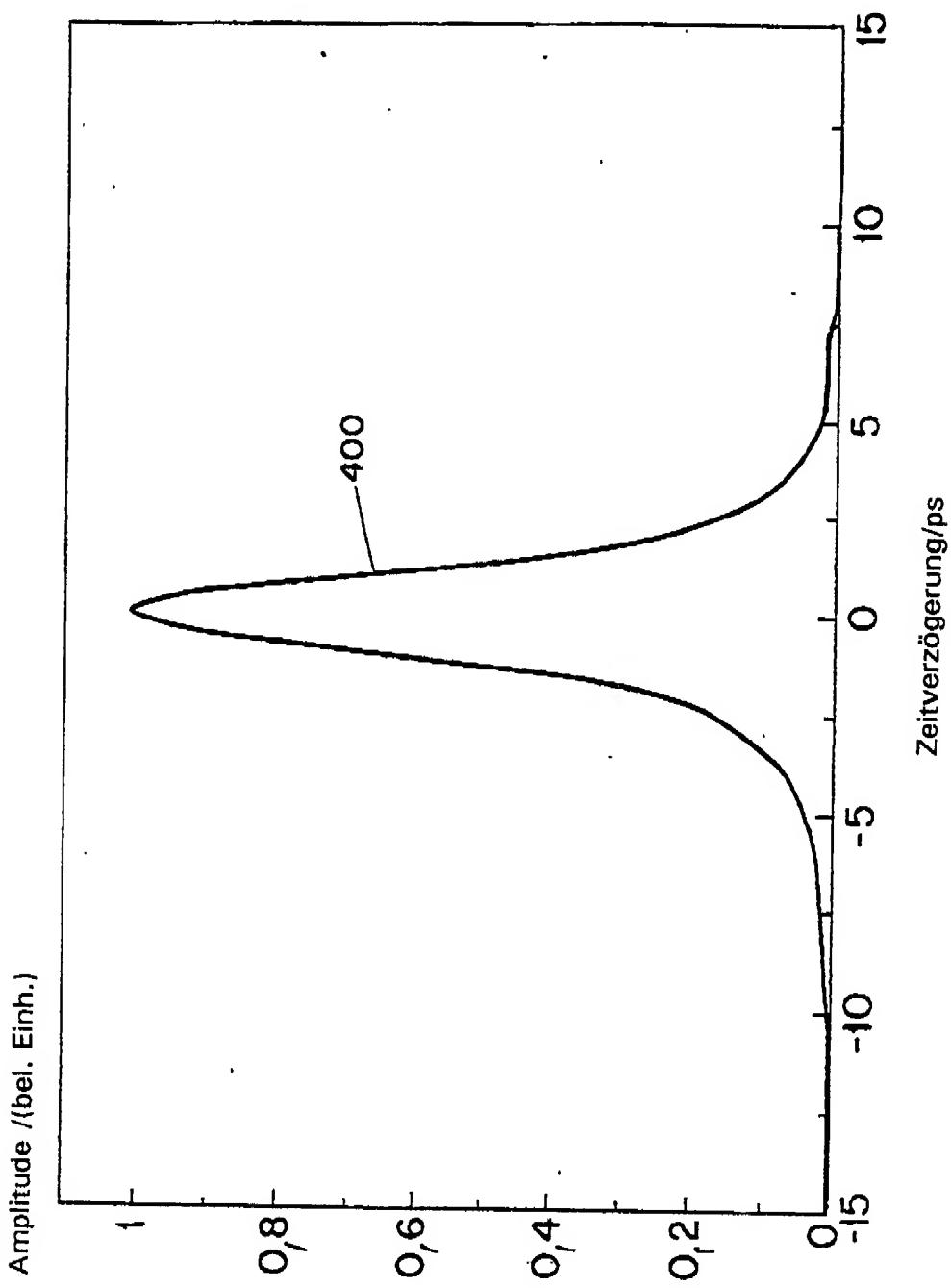


Fig. 4



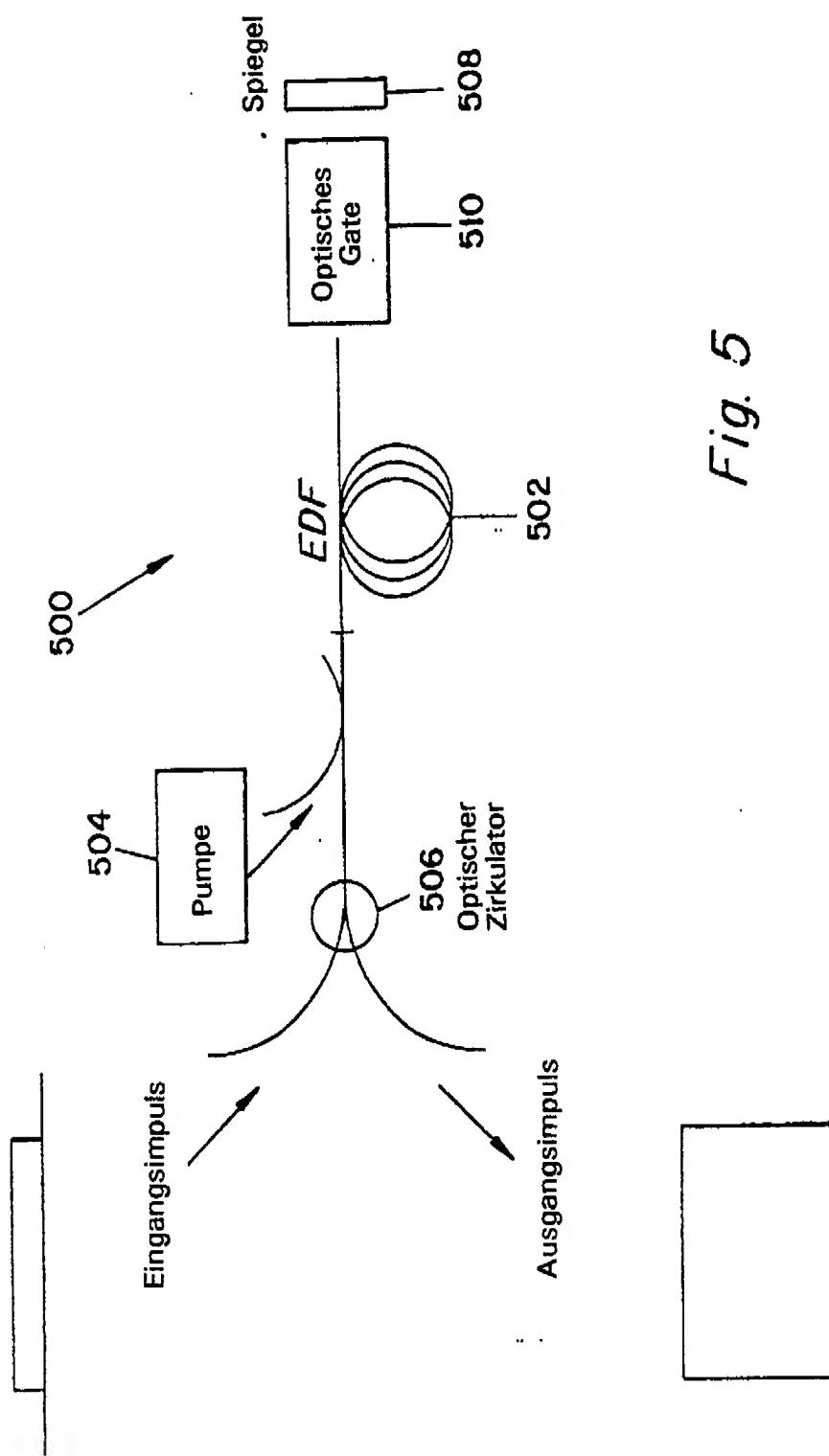


Fig. 5